

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650349

研究課題名(和文)筋疲労・筋電位導関数の導出と機能回復を促す機能的電気刺激

研究課題名(英文)The derivative of muscle fatigue with respect to electromyography and functional electrical stimulation to quicken functional recovery

研究代表者

横井 浩史(Yokoi, Hiroshi)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：90271634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：電気刺激により筋群の収縮を誘発することで、運動と感覚の訓練を行う機能的電気刺激は、麻痺疾患の運動機能回復に有効な手法とされているが、電気刺激に伴う強い疲労感や忌避反応などの課題はまだ残っている。本研究では、電気刺激法を用いた麻痺疾患の運動機能回復訓練のために、電気刺激時に計測した筋電位の周波数特徴から筋疲労を推定する方法を開発し、電気刺激パラメータによる誘発運動と脳賦活の同時計測を行うことで、脳活動及び運動量と刺激パラメータの関係を明らかにした。これらの研究成果に基づいた開発した刺激装置を下肢麻痺の被験者に適用し、長期訓練によって脳賦活領域の拡大縮小が引き起こされていることが示された。

研究成果の概要(英文)：Functional Electrical Stimulation (FES) is considered effective to recover the motor function of the paralytic by inducing muscle contraction with paralytic electrical stimulation. However, the strong fatigue and avoidance response when using FES is yet to be overcome in order to improve its effectiveness and acceptability. This study therefore developed a muscle fatigue evaluation method according to the frequency characteristics of the electromyography associated with FES, and elucidated the relationship between FES parameters and the induced body movement and cortical activation. The FES device developed based on the findings of this study was validated by subjects with leg paralysis. The expansion and shrinkage of the brain areas activated was observed during the long-term exercise using the FES device.

研究分野：医用福祉機械

キーワード：生体機能代行 機能的電気刺激 筋疲労 筋電位

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の社会は成熟期を迎えており、物質的にも社会インフラの面でも充実してきているが、その一方で、年々増え続ける身体障害者数は、180万人に及ぶなどの矛盾を抱えている。そこで、身体障害者数の増加に伴う医療費の高騰と福祉の劣化を防ぐことへの社会的要求に対する有効な方法を見つけるために、医工連携の先端技術を用いて身体機能を取り戻すための効果的な補助機器を開発する必要がある。国内外の動向としては、筋群への神経支配に関わる工学技術の発展に伴い、先進国を中心に医工連携が進みつつある。特に、神経や筋群への機能的電気刺激を用いた研究の有効性が指摘されている。しかしながら、機能的電気刺激が強い疲労感を感じる問題については、有効な手法が発見されておらず未解決のままである。

### 2. 研究の目的

本研究では、電気刺激法を用いた麻痺疾患の運動機能回復訓練のために、筋疲労のリアルタイム計測と、運動と感覚に関する脳賦活の計測により、忌避反応や疲労を少なくする刺激波形のパラメータを導出する方法論を開発し、長期リハビリテーションへ応用する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 筋活動と脳活動の同時計測による電気刺激パラメータの最適化

- 電極:10cm×9cm, 負荷:5kg
- 脱力状態の大腿四頭筋(左脚)を刺激
- 「5秒刺激-55秒休憩」を実施
- 膝関節の伸展角度を計測
- 1日24パターン×3試行を複数日実施
- 2・3試行目を解析



刺激パラメータ								
Burst[Hz]	20	25	33	50	100	200	Voltage[V]	疼痛の無い 最大値(8~12V)
(1/tb[ms])	(50)	(40)	(30)	(20)	(10)	(5)		
Duty[%]	30	50	70	90			Carrier[Hz]	2000(C_Duty80%)

図1 計測システムと実験条件

電気刺激を付与した際の生体情報を計測するため、fNIRS 及びトレーニング機器を用いた身体運動、筋活動及び脳活動を同時に計測可能な多チャンネル運動計測・解析システムを構築した(図1)。

健常者10名(20代8名, 50代2名)に対して刺激パラメータと発現する運動と脳活動の関係を調査した。具体的には、平成25年度と同様にトレーニング機器リハトレーナーに着座した被験者の大腿四頭筋に電気刺激を付与することで膝関節の伸展を誘発させて一定負荷を持ち上げるタスクを実施し、これにより生じる最大伸展角度を運動量評価に用いる。脳活動評価には、運動時にも計測可能なfNIRS(島津製作所 Foire3000)を用いた。電気刺激は多チャンネル小型電気刺激装置を用いて行う。また、刺激波形は低周

波の矩形波を高周波のキャリア波で変調した刺激波形を用いる。

リハビリに必要な筋収縮力を確保し、筋疲労が少なく、かつ刺激に対する忌避反応の少ないような電気刺激手法を構築するため、刺激パラメータと発現する運動の関係を調査した。刺激パラメータは、刺激頻度を表現するBurst周波数(刺激頻度5, 10, 20, 30, 40, 50[ms]の逆数)とエネルギー強度を表現するDuty比(30, 50, 70, 90[%])とした。結果として、Duty比が低く刺激頻度が低いパラメータ対とDuty比が高く刺激頻度が高いパラメータ対において、相対的に最大伸展角度が低くなる傾向にあることが明らかとなった。

忌避反応の少ない電気刺激波形が満足すべき条件を明らかにするために、前年度に構築した筋活動及び脳活動を同時に計測可能な実験システムを用いて、刺激パラメータごとの利用者の脳活動との対応関係を調べた。安静時あるいは自発運動中の脳活動と電気刺激中の脳活動を比較した結果、安静時と比較し自発運動のみ、自発運動+刺激に関して運動感覚野に強い賦活が見られた。前述実験の結果をもとに、Burst周波数を25Hzと100Hz, Duty比を30%と90%として、これらの組み合わせ全4パターンによる刺激を1回の実験についてそれぞれ10回ずつ行った。この実験を1人の被験者について10回実施した。ただし、筋疲労の影響を少なくするために各実験は少なくとも1日の間隔を空けた

#### (2) 電気刺激時の筋電計測による疲労度関数の推定

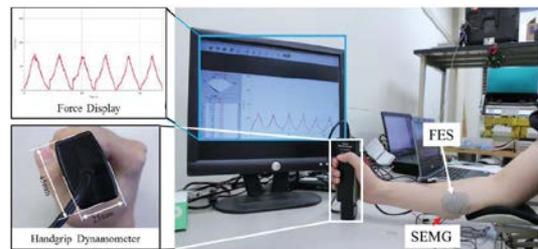


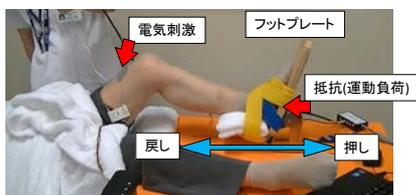
図2 発揮筋力による筋電位の計測

筋疲労の指標を調べるため、電気刺激を付与しながら一定の筋負荷を付与することで筋の等尺性収縮を発生させ、その時の各種計測データとその時間的推移、随意収縮と電気刺激のみにおける収縮との比率から、それぞれの筋負荷条件における疲労度およびその疲労要因の推定を試みた。具体的には、まず、デジタル握力計により一定握力での等尺性随意収縮時における筋活動度合とその時間的推移を表面筋電位センサにより計測した(図2)。

図2のシステムで計測された多チャンネル筋電位信号を周波数解析し、その一定時間に

おける平均およびその変動値、また周波数特徴値（周波数中央値＝MPF）から筋張力変化や休憩に対する影響など、疲労回復により発生する外乱を除去し、筋活動強度とその継続時間の関数（疲労度関数）として疲労度を推定する関数を導出した。また、スペクトラムの経時変化の様相から随意運動における疲労と類似しているのか・電気刺激による疲労か否かの分別を行うことで、電気刺激における疲労を評価した。時間的推移を考慮した筋疲労推定法を構築するために、Wavelet 変換した筋電位データの高周波帯域の Wavelet 係数から発揮筋張力を推定し、筋疲労度指標（最大発揮筋張力の低下度合）との関係式に、得られた発揮筋張力推定値を適用することで筋疲労度の推定手法を開発した。

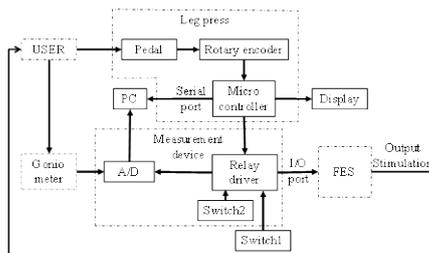
### (3) 運動の補助と回復の評価実験



a. レッグプレス



b. PET計測



c. システム図

### 図3 PET 計測のためのレッグプレスシステム

上記の研究成果に基づいた開発した F E S 刺激装置を、下肢麻痺を有する被験者に、単回使用時と長期訓練使用時に分けて脳機能変化を、PET を用いて評価検討した。全体のシステムは図3に示す。PET 計測に適するベッドサイドでもリハビリが可能な電気刺激運動型レッグプレスシステムを構築し、FES を用いた長期訓練によって脳賦活領域の拡大縮小を観察した。被験者1名（70歳代、脳梗塞発症4年経過）に随意運動、電気刺激のみ、電気刺激+随意運動との3つの条件における脳賦活状態を計測した。

## 4. 研究成果

### (1) 筋活動と脳活動の同時計測による電気刺激パラメータの最適化

パラメータごとの全被験者の膝伸展角の平均を比較したところ、パラメータ間での有意差はなかったが、ヒストグラム（図4）で膝伸展角の分布には、burst 周波数が 25Hz、duty 比が 90%の組み合わせでは単峰性を示している。それ以外のパラメータ組み合わせでは運動が起こらない場合や起こったとしても小さい傾向があった。これは、刺激パラメータの調整によってコンスタントに運動を誘発しうることを意味しており、電気刺激による長期リハビリテーションにおいて、パラメータ選定の重要性を示している。

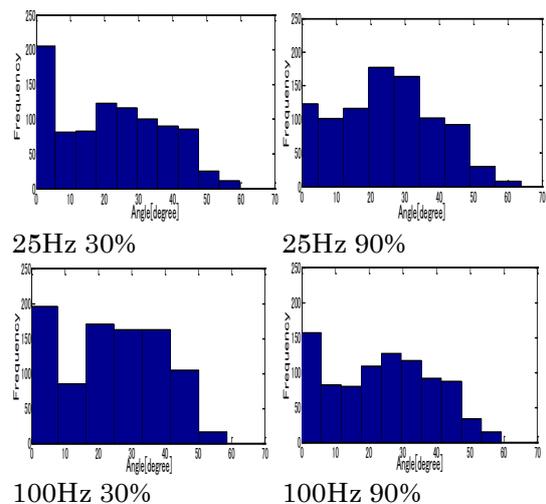


図4 膝伸展角の分布

刺激パラメータによらない全体的な脳賦活の推移を見るために、刺激パラメータによらず全被験者について集計した脳賦活部位の数の時系列変化を図5に示す。横軸が試行回数、縦軸が脳賦活部位数である。賦活部位の数が増減を繰り返して徐々に増加し、8回目で最大の賦活数となり、その後減少しており、FES を用いた長期訓練によって、ニューロリハビリでよく見られる現象である脳賦活領域の拡大縮小が引き起こされている可能性を示している。

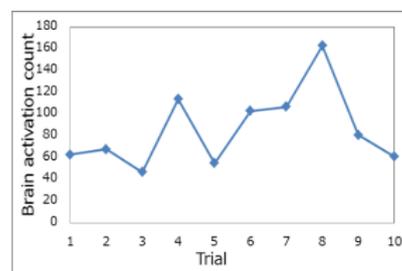


図5 平均脳賦活量

### (2) 電気刺激時の筋電計測による疲労度関数の推定

筋活動電位を用いて電気刺激中の筋疲労をリアルタイムに推定するために、筋活動電位

信号の刺激ノイズ除去手法と筋活動電位信号を用いた筋疲労推定法の構築を実施した。筋活動電位信号の刺激ノイズ除去手法として、電気刺激波形が一定周期をもつ方形波であること、また刺激周波数は既知であることから、刺激周波数の整数倍の計測周波数でサンプリングした筋活動信号に対する1周期前との自己時間差差分を算出することで、筋活動電位に共通に重畳される刺激信号を除去する単純手法を開発した。フィルタリング前後の結果を図6に示す。結果として、刺激信号が除去されていることがわかる。表面筋電位から筋疲労を推定する方法として、(1)まず筋電位データを連続Wavelet変換して高周波帯域のWavelet係数の平均2乗平方根(RMS)から発揮筋張力を推定し、(2)あらかじめ求めておいた発揮筋張力時間積分値と筋疲労度指標(最大発揮筋張力の低下度合)との関係式に、得られた発揮筋張力推定値を適用することで筋疲労度の推定値を得る手法を開発し、検証実験によってその有用性を確認した。

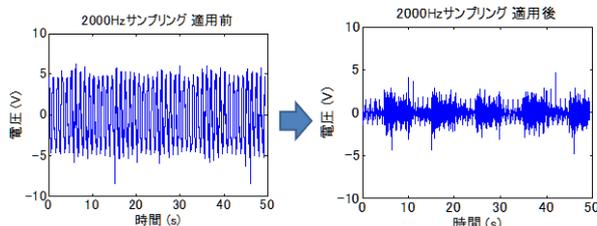


図6 平均脳賦活量

また、電気刺激によって生じた筋疲労が刺激を付与しない場合の随意運動による疲労に比べどの程度異なるのかを明らかにするため、運動持続時の表面筋電信号に対して時系列スペクトラム分析を施し得られる中央周波数の低下量を比較した。対象とする運動は、握力把持であり、最大発揮握力の25%程度の握力で握力計を把持している間に刺激を付与する。電気刺激中は表面筋電位に対して電気刺激がアーチファクトとなるため、筋疲労を推定するタイミングで刺激の付与を5秒間中止しその間の表面筋電位信号で推定を実施した。その結果を図7に示す。

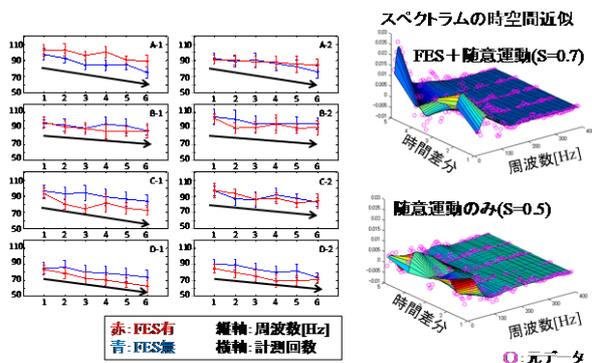


図7 電気刺激の有無による筋疲労度(中心周波数)変化及びスペクトラム波形変化

筋疲労の増加に伴い中央周波数が低下することは知られているが、電気刺激を付与したほうが、付与しないで運動を持続した場合にくらべて有意に筋疲労が早く起こることが明らかとなった。また、筋電のスペクトラム波形の時間変化が、刺激の有無で異なることを明らかにした。すなわち、その波形特性をみれば電気刺激によって生じる筋疲労を予測する可能性があることを示している。

### (3) 運動の補助と回復の評価実験

PETによる脳活動計測の結果、随意運動のみでは下肢領域の運動野を中心に賦活し、電気刺激のみでは脳の賦活は軽度であったが、随意運動と電気刺激を同時に実施すると運動野のみでなく感覚野領域まで広い範囲で賦活していた(図8)。また、1か月間の電気刺激を用いたリハビリテーションを継続した後に同様なPET検査を実施すると、初回と同様なタスクにも関わらず随意運動のみでの脳賦活領域は減少し、電気刺激と随意運動を併用した際の脳賦活がより強く出現していた。さらに電気刺激訓練直後に小脳領域に脳賦活を認められ、リハビリテーション効果が期待できると推察される。

長期訓練の変化としては、1か月間の訓練を行うことで運動野の賦活は病側に集約する傾向がみられた。長期訓練と同様の脳賦活変化がFES併用運動時におこることはリハビリテーションによる臨床的效果を検討する上で興味深い結果であった。

PET-FES menu

	自発運動	FES刺激	前処置
1回目	(-)	(-)	-
2回目	(+)	(-)	前運動なし
3回目	(-)	(+)	休憩9分+刺激1分
4回目	(+)	(+)	休憩9分+自発刺激1分
5回目	(+)	(-)	自発刺激15分
6回目	(+)	(-)	休憩9分+自発1分

電圧 20V, キャリア周波数 2000~3000Hz,  
パースト周波数 200/50Hz(7:3), デューティ比 30%

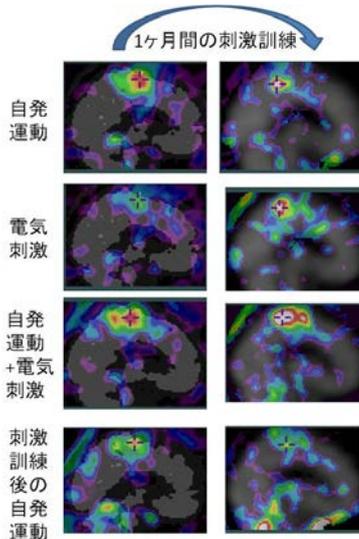


図8 刺激訓練前後での脳活動PETの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- [1] 久保田雅史, 山村修, 神澤朋子, 五十嵐千秋, 松尾英明, 成瀬寛亮, 嶋田誠一郎, 加藤龍, 横井浩史, 内田研造, 馬場久敏, 急性期脳梗塞患者に対する歩行中の機能的電気刺激治療が歩容及び内側感覚運動皮質へのヘモグロビン濃度へ及ぼす即時的効果, 理学療法学, Vol.41, No.1, pp13-20, 2014.

〔学会発表〕(計22件)

- [1] 大平美里, 神澤朋子, 森下壮一郎, 姜銀来, 山村修, 横井浩史, 感覚フィードバックを伴う機能的電気刺激を用いた運動機能回復応用に関する研究: 健常者における脳活動の時間的推移に関する検証, 第27回自律分散システム・シンポジウム, 2C1-3, 東京, 2015
- [2] Osamu Yamamura, Tomoko Kamisawa, Masafumi Kubota, Chiaki Igarashi, Yudai Watabe, Seiichiro Shimada, Tetsuya Tujikawa, Hidehiko Okazawa, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Kenzo Uchida, Hisatoshi Baba, Tadanori Hamano, Yasunari Nakamoto, Effect of burst stimulation by high frequency biphasic square-wave pulse on cortical perfusion after stroke: A pilot study, American Society of Neurorehabilitation Annual Meeting, Washington DC, USA, 2014.11.13.
- [3] 大平美里, 森下壮一郎, 姜銀来, 横井浩史, 運動機能回復のための FES ニューロリハビリテーションにより誘発される脳活動パターン評価—自己相関解析による周期性検出—, The 8th Annual Meeting of The Japanese Society for Motor Control, p.54, 茨城, 2014.8.8.
- [4] 佐藤佑樹, 大平美里, 加藤龍, 横井浩史, 効果的な筋活動を促す電極配置を再配置可能にする電気刺激装置の開発, 第15回日本電気生理運動学会(第3回SICE 電気生理運動学研究会), pp.1-2, 神奈川, 2014.9.6.
- [5] 佐藤佑樹, 大平美里, 加藤龍, 横井浩史, 個人に適応した電極位置を探索する電気刺激装置の開発, 第35回バイオメカニズム学術講演会, pp.211-222, 岡山, 2014.9.8.
- [6] 佐藤佑樹, 横井浩史, 機能的電気刺激における電極位置が筋収縮に与える影響, The 11th IEEE Transdisciplinary - Oriented Workshop for Emerging Researchers, 東京, 2014.8.8.
- [7] 久保田雅史, 神澤朋子, 五十嵐千秋, 山村修, 嶋田誠一郎, 松尾英明, 成瀬寛亮, 岡沢秀彦, 加藤龍, 横井浩史, 馬場久敏, 1か月間の集中的な機能的電気刺激療法前後の運動機能と脳機能画像の変化: 症例報告, 第49回日本理学療法学会大会, 横浜, 2014.5.31.

- [8] 五十嵐千秋, 久保田雅史, 神澤朋子, 山村修, 岡沢秀彦, 加藤龍, 横井浩史, 嶋田誠一郎, 馬場久敏, 脳卒中患者に対する電気刺激を併用した下肢伸展運動課題が脳活動に与える影響, 第49回日本理学療法学会大会, 横浜, 2014.5.31.
- [9] 神澤朋子, 山村修, 辻川哲也, 岡沢秀彦, 濱野忠則, 久保田雅史, 五十嵐千秋, 内田研造, 加藤龍, 横井浩史, 慢性期脳卒中患者における機能的電気刺激療法の効果:H2[15O] PETによる検討, 第55回日本神経学会学会大会, P-085-2, 福岡, 2014.5.23.
- [10] 大平美里, 森下壮一郎, 姜銀来, 横井浩史, 脳-身体運動相互作用モデル構築—機能的電気刺激に誘発された脳活動の周期性解析—, 第20回創発システムシンポジウム, p.58, 長野, 2014.8.31.
- [11] Tomoko Kamisawa, Osamu Yamamura, Masafumi Kubota, Chiaki Igarashi, Tetsuya Tsujikawa, Kenzo Uchida, Minako Suzuki, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Tadanori Hamano, Yasunari Nakamoto, Hidehiko Okazawa, The Effect of Functional Electrical Stimulation on H2[15O]PET in the Post-Stroke Patients, International Workshop on Molecular Functional Imaging for Brain and Gynecologic Oncology, Fukui, Japan, 2014.3.3.
- [12] Masafumi Kubota, Osamu Yamamura, Tomoko Kamisawa, Chiaki Igarashi, Hideaki Matsuo, Hiroaki Naruse, Seiichiro Shimada, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, Kenzo Uchida, Hisatoshi Baba, Immediate Effects of FES on Kinetics and Oxygenation in Cortices during Gait in Stroke Patients, The 6th AWP&12th ACPT Combined Congress, Taichung, Taiwan, 2013.9.8.
- [13] Chiaki Igarashi, Masafumi Kubota, Hiroaki Naruse, Seiichiro Shimada, Osamu Yamamura, Tomoko Kamisawa, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi, and Hisatoshi Baba, Safety studies of newly developed functional electrical stimulation device, The 6th AWP & 12th ACPT Combined Congress, Taichung, Taiwan, 2013.9.8.
- [14] 神澤朋子, 山村修, 辻川哲也, 岡沢秀彦, 濱野忠則, 久保田雅史, 五十嵐千秋, 内田研造, 鈴木美奈子, 加藤龍, 横井浩史, 慢性期脳卒中患者における機能的電気刺激療法施行下の脳機能画像評価: 異なる運動タスク間の比較, 第39回日本脳卒中学会総会, 大阪, 2014.5.23.
- [15] 佐藤佑樹, 鈴木美奈子, 加藤龍, 横井浩史, 多点電極による表面電気刺激の電極配置探索法の検討, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2013, pp.689-690, 滋賀, 2013.11.19.
- [16] 鈴木美奈子, 佐藤佑樹, 加藤龍, 横井浩史, 山村修, 神澤朋子, 久保田雅史, 五

十嵐千秋, 運動機能の再建に向けた多チャンネル型表面電気刺激装置の開発", 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2013, pp.693-698, 滋賀, 2013.11.19.

- [17] 佐藤佑樹, 鈴木美奈子, 加藤龍, 横井浩史, 表面電気刺激における四肢制御のための刺激電極の最適配置決定手法—多点電極の中から最適な電極を選出する刺激選択回路の設計—, 第 14 回日本電気生理運動学会大会, pp.24-25, 大阪, 2013.7.7.
- [18] Takashi Mori, Tatsuya Seki, Ryu Kato, Soichiro Morishita, Osamu Yamamura and Hiroshi Yokoi, Parameter optimization of surface electrical stimulation for movement assistance in joints of extremities, XIXth Congress of the International Society of Electrophysiology & Kinesiology, PMRE P1.4, Brisbane, Australia, 2012.07.20.
- [19] 佐藤佑樹, 鈴木美奈子, 加藤龍, 横井浩史, 下肢麻痺者の運動補助のための表面電気刺激装置の開発—多点電極の中から最適な電極を選出するための刺激選択回路の設計—, バイオメカニズム学術講演会, 仙台, 2012.12.15.
- [20] 加藤龍, 森崇, 鈴木美奈子, 横井浩史, 久保田雅彦, 山村修, 運動補助とニューロリハビリテーションを目的とした携帯型機能的電気刺激システムの開発, 第 30 回ロボット学会学術講演会, 札幌, 2012.09.18.
- [21] 鈴木美奈子, 関達也, 加藤龍, 森下壮一郎, 横井浩史, 機能的電気刺激が誘発する筋疲労の推定に関する研究, 第 30 回ロボット学会学術講演会, 札幌, 2012.9.20.
- [22] 粕谷昌宏, 関雅俊, 川村和也, 小林洋, 藤江正克, 横井浩史, 当電位面を用いた筋電計からの電気刺激ノイズ抑制手法 第 30 回ロボット学会学術講演会, 札幌, 2012.9.20.

[図書] (計 3 件)

- [1] Hiroshi Yokoi, Ryu Kato, Takashi Mori, Osamu Yamamura and Masafumi Kubota, Functional Electrical Stimulation Based on Interference-Driven PWM Signals for Neuro-Rehabilitation, Technological Advancements in Biomedicine for Healthcare Applications, in Jinglong Wu eds, Technological Advancements in Biomedicine for Healthcare Applications, 180-192, IGI Global, USA, 2012
- [2] Hiroshi Yokoi, Yuki Sato, Minako Suzuki, Tatsuhiko Nakamura, Takashi Mori, Soichiro Morishita, Ryu Kato, Osamu Yamamura, Masafumi Kubota, Tomoko Kamisawa, Chiaki Igarashi, Tadashi Isa, Tatsuya Umeda, Hidenori Watanabe, Yukio Nishimura, Katsunori Ikoma, and Tamaki

Miyamoto, Engineering Approach for Functional Recovery based on Body Image Adjustment by using Biofeedback of Electrical Stimulation, in Kenji Kansaku, Leonardo G. Cohen, and Niels Birbaumer eds. Clinical Systems Neuroscience, Part 2: Body Image Adjustment and Neuroprosthetics, 203-247, Springer Japan, 2015.

- [3] 森下壮一郎, 横井浩史, ロボティクスによる上肢運動機能再建のための BMI, 別冊「医学のあゆみ」BMI(Brain-Machine Interface)の現状と展望, 吉峰俊樹, 川人光男 (編), 第 15 章, pp.99-104, 医歯薬出版株式会社, 東京, 2014.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 電気刺激システム及び計測システム  
発明者: 佐藤佑樹, 鈴木美奈子, 横井浩史, 加藤龍, 中村達弘, 森下壮一郎  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2013-259481  
出願年月日: 2013 年 12 月 16 日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 刺激信号生成装置及び刺激信号生成方法  
発明者: 横井浩史, 加藤龍, 中村達弘, 森下壮一郎, 山村修  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特許第 5569890 号  
出願年月日: 2011 年 10 月 14 日  
取得年月日: 2014 年 07 月 04 日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ  
電気通信大学横井研究室  
<http://www.hi.mce.uec.ac.jp/yklab/>  
電気通信大学脳科学ライフサポート研究センター  
<http://blsc-uec.net/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横井 浩史 (YOKOI, Hiroshi)  
電気通信大学情報理工学研究所・教授  
研究者番号: 90271634

(2) 研究分担者

山田 幸生 (YAMADA, Yukio)  
電気通信大学脳科学ライフサポート研究センター・教授  
研究者番号: 10334583